

沖浜帯における平衡断面の形成機構に関する研究

小野 信幸*・入江 功**・大内田佳介***・桃 寄 真悟****

1. はじめに

室内レベルの水槽内で、一様勾配の移動床海浜に同一特性の波を長時間作用させた場合、海底勾配は徐々に変化し、最終的に一定の断面形状（平衡断面）に落ち着く様子が観察される。その海浜断面の沖浜帯では砂れんが形成され、その場合の漂砂の移動方向は底面が水平ならば通常沖向きである（砂村ら, 1978）。しかし、沿岸砂洲の沖側では海底勾配が急な状態で安定し、これが地形安定に大きく寄与していることを考えると、底面が勾配をもつ場合に重力の効果（沖向き漂砂に寄与）と釣り合うように底質移動を岸向きにする要素が存在すると考えねばならない。

本研究では、海底勾配が変化した場合に大きく影響を受ける波形の非対称性について再整理し、これと砂れん上の底質移動との関連性について調べた。また、海浜断面が準平衡断面に向かって変形する場合に生じる漂砂特性についての考察を行った。

2. 砂れん上の底質移動に関する実験

(1) 実験方法

ここでは、種々の海底勾配に対する波形の非対称性と砂れん上の漂砂の関連を明らかにすることを目的とした実験について述べる。実験は図-1 に示すような長さ 28 m, 幅 0.3 m, 高さ 0.5 m の二次元造波水路の一端に、勾配 $\tan \beta = 1/20, 1/10, 1/5$ の 3 種類の斜面を設置して行った。斜面上には正弦波形で模したモルタル製の固定床砂れん（砂れん波長 $\lambda = 5.5$ cm, 砂れん波高 $\eta = 1.0$ cm）を敷き詰めた。それぞれの勾配に表-1 に示す 9 ケースの波を入射させ、水面波形と砂れん上の底質移動速度の測定を行った。入射波は、沖波波形勾配 H_0/L_0 が 0.01, 0.02, 0.03 の 3 種類でそれぞれ波高, 周期の異なる 3 種類の規則波である。

水面波形の測定は、水面変位を容量式波高計を用いて碎波帯内から斜面の沖側端まで水平方向に 10 cm 間隔

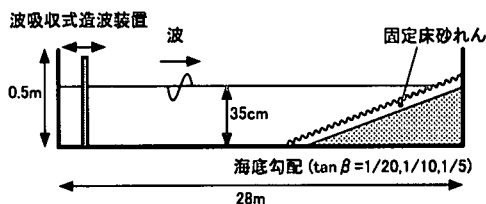


図-1 実験装置図

で測定し、得られた波形記録から波形の上下の非対称度を表す Skeweness (S_k) と前後の非対称度を表す Atiltiness (A_t) をそれぞれ以下の (1), (2) 式を用いて算定した。式中, N はデータ数, ξ_i ($i=1, \dots, N$) は水面変位データ, $\bar{\xi}$ は $(\xi_{i+1} - \xi_i)/\Delta t$ (Δt はサンプリングの時間間隔), $\bar{\xi}$, $\bar{\xi}$ はそれぞれ, ξ と $\bar{\xi}$ の平均値である。

$$S_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\xi_i - \bar{\xi})^3 / \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\xi_i - \bar{\xi})^2 \right]^{3/2} \dots\dots (1)$$

$$A_t = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\xi - \bar{\xi})^3 / \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (\xi_i - \bar{\xi})^2 \right]^{3/2} \dots\dots\dots (2)$$

底質移動速度の測定は、各波に対し表-1 に示した水深 h の位置で行った。この水深位置にある砂れんの 2 つの谷部に中央粒径 $d_{50} = 0.16$ mm, 比重 $s = 2.65$ の砂を 20 g ずつ投入し、波を数分間作用させた。その後砂を回収・計量して砂分布の重心位置 X_g を求め、その時間変化から重心移動速度 V_g を算定した。この V_g の測定水深は、移動床の場合に形成される砂れん波長が底面での水粒子軌道全径 d_0 と深く関連し、その比 d_0/λ が約 1.7 となることが知られており（渡辺ら, 1989）、これを満足するよう定めたものである。また、波形の非対称性は波の非線形性を表す指標のアーセル数 $U_r (= HL^2/h^3$: H は波高, L は波長) により変化するため、同一の H_0/L_0 の波に対し U_r の異なる 3 ケースとして定めた。なお, V_g の測定水深での波は全て碎波前の状態である。

(2) 実験結果

実験結果を図-2 に示す。 V_g の測定において変化させた量は, U_r , H_0/L_0 , $\tan \beta$ の 3 種である。そこで、海底勾配や波形勾配が異なる波を統一の指標で表すために

* 正 会 員 工 修 九州大学大学院助手 工学研究院
** 正 会 員 工 博 九州大学大学院教授 工学研究院
*** 正 会 員 北九州大学
**** 学生会員 九州大学大学院工学研究科

表-1 入射波の条件と底質移動の測定点

Case	波形勾配	アーセル数	周期	波高	水深
	H_0/L_0	U_r	T (s)	H_0 (cm)	h (cm)
A-1	0.01	115	1.5	3.5	9.1
A-2		80	1.6	3.9	12
A-3		35	1.8	4.6	19
B-1	0.02	115	1.2	4.4	7.8
B-2		80	1.3	5	10.3
B-3		35	1.5	6.1	19
C-1	0.03	115	1	5	7.2
C-2		80	1.1	5.7	9.5
C-3		35	1.3	7.7	19

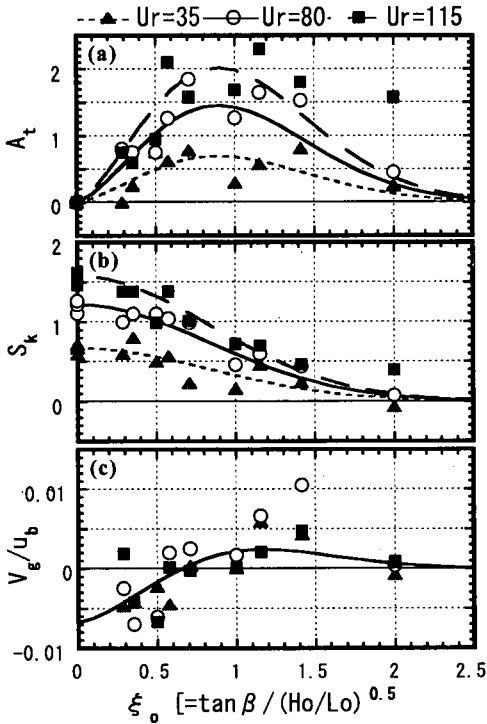


図-2 波形の非対称性と底質移動速度

Surf Similarity パラメータ, $\xi_0 (= \tan \beta / \sqrt{H_0/L_0})$ を用いて整理した。 ξ_0 は通常碎波形態の分類に用いられる指標であるが, 斜面上を進む波が前傾して碎波にいたるまでの過程においても影響を与える量であると考えた。図は, 横軸に ξ_0 , 縦軸には上から, 波形の前後非対称性 (A_t), 上下非対称性 (S_k) 及び V_g を底面での流速振幅 u_b で無次元化した V_g/u_b であり, U_r の等しいデータを同一のマーカーでプロットした。また, S_k については勾配がゼロ ($\xi_0=0$) の場合の参考値としてクノイド波理論より求めた値も同時にプロットした。

a) 波形の非対称性の変化特性

波形の非対称性に関する実験値を概観すると, 同一のアーセル数に対し, A_t は放物線状に値が変化し, $\xi_0 < 1$ で

は増加, $\xi_0 > 1$ では減少する傾向が, S_k は ξ_0 の増加に伴って単調に減少する傾向が見られた。また, ξ_0 が等しければ, U_r の増加により S_k , A_t は共に増大している。

波形の前後非対称は海底が水平ならばゼロであり, 勾配の増加とともに増加する量であると考えられる。また, 急勾配の極限である直立壁では前後の非対称は生じ得ない。上下非対称性は有限振幅波理論の適用領域では海底が水平でも必ず発生し, また海底勾配が大きくなると減少する傾向については, これまでに多くの研究によっても報告されている。(例えば, 武若ら, 1996) そこで, 以上の類推と実験結果の特徴をふまえ, A_t と S_k についての近似曲線を求め, それぞれ以下のように表した。

$$A_t = 0.0683 U_r^{0.90} \xi_0^{1.42} \exp(-0.886 \xi_0^2) \dots\dots\dots (3)$$

$$S_k = S_{k0} \exp(-0.714 \xi_0^2) \dots\dots\dots (4)$$

$$S_{k0} = (0.027 + 1.3 H_0/L_0) U_r^{(0.80 - 4.2 H_0/L_0)} \dots\dots\dots (5)$$

ここで, S_{k0} は水平床の場合の S_k であり, クノイド波理論の算定結果から近似式を作ったものである。図-2の (a), (b) に描かれている曲線は, (3) (4) 式を用いて算定した結果であり, A_t , S_k の変化傾向をよく表していると思われる。

b) 底質移動速度 V_g の変化特性

図-2(c) より, 底質移動速度 (V_g/u_b) は, ξ_0 が小さいところでは冲向きであり, $\xi_0 = 0.5 \sim 1.0$ あたりで岸向きに転じる傾向が読み取れる。

実験時の観察では, 本実験のような固定床砂れん上に置かれた底質の移動は移動床の場合に比べ渦により巻き上げられた砂が浮遊状態で移動する現象が支配的である。従って, 本実験で測定された V_g は主に砂れん上の浮遊砂の移動をよく表すものと考えられる。砂れん上の底質移動は, 砂れん頂部の岸側, 沖側に形成される渦の規模に大きく影響を受ける。 $S_k > 0$ の波の下では, 砂れん頂部岸側により大きな渦が形成されるため, 底質の移動方向は冲向きとなる。 $A_t > 0$ の波の下では, 砂粒子に作用する流体の加速度が岸向きに大きくなるため, 底質の移動方向を岸向きにする力となる。

実験結果に見られた波形非対称性の変化傾向と底質移動を結びつけて考えると, 海底勾配がゼロのときは S_k の効果のみが働いて砂移動は冲向きである。海底勾配が増加すると S_k の減少, A_t の増加が生じ, 底質移動は岸向きへと変化する。勾配が更に大きくなると, S_k と共に A_t も減少する様になり, 底面では浮遊による net の移動は生じなくなる。これらの考察より, 砂れん上の底質移動速度 V_g を S_k と A_t の線形結合で表せると仮定して重回帰分析を行ったところ以下の式を得た。

$$V_g/u_b = -0.00554 S_k + 0.00385 A_t \dots\dots\dots (6)$$

式中の係数の符号もまた, S_k は冲向き, A_t は岸向きへの

移動に寄与することを示している。図-2(c)に描かれている曲線は、 $H_0/L_0=0.02$, $U_r=80$ のケースについて式(3)~(6)を用いて算定したものである。これは海底勾配の変化に対する砂れん上の底質移動の特徴をよく表していると思われる。

(3) 海底勾配の変化による漂砂特性

海底勾配による底質移動の特性が、移動床での海浜変形特性にどのように影響するかについて考察した。図-3の上段は、中央粒径 $d_{50}=0.16$ mm の砂により、初期勾配 1/30 の模型海浜を作成し、これに有義波高 $H_{1/3}=8$ cm, 有義周期 $T_{1/3}=1.5$ s の波を 120 時間作用させた場合の断面形状である。図-3下段は、沖浜帯に位置する領域(上段の四角で囲んだ部分)の拡大図であり、120 時間後の断面の一部を勾配 1/5 になるように掘削し、その後同じ波を 30 時間作用させた場合の断面変形の様子を示している。図中の破線で示す水深の範囲は、勾配が 1/30~1/5 の範囲で変化するので、この領域の海底勾配と漂砂量との関係を図-4にプロットした。

図-4の横軸は海底勾配、縦軸は無次元化した実測漂砂量 $\Phi_{exp} (= (1-n)q/wd_{50})$ を Madsen ら (1976) の半周期平均漂砂量式 $(=12.5\psi^3)$ で除した量である(岸向き正)。ここで、 q は地形変化から求めた岸沖漂砂量、 w は底質の沈降速度、 n は空隙率、 ψ はシルズ数である。図は、海浜断面が初期勾配 (1/30) から自然に変形していくときのデータと、掘削後の変形時のデータを分けて表示した。

図中の $\tan \beta=0.03$ から 0.10 付近までは主に自然に変形する場合のデータであり、海底勾配の増加により沖向き漂砂量が減少する傾向が見られる。また、主に掘削後のデータで占められる $\tan \beta$ が 0.10 以上では、勾配が大きいほど沖向きの漂砂量も大きい。両者のデータの間中に位置する $\tan \beta=1/10$ 程度では漂砂量がゼロ近くまで減少している。

このような漂砂量の変化傾向は、図-2(c)と同様の変化傾向を示しており、(2)で示した V_b に関わる漂砂特性が深く寄与していると考えられる。図-4において急勾配で沖向きの傾向が強いのは、重力による沖向きの力が掃流砂に強く働くためと考えられる。

移動床での現象から考察される沖浜帯の断面の安定化は、海底勾配が大きければ、これを緩やかにする方向(沖向き)への砂移動が生じ、重力の効果と今回の固定床実験から得られた諸量がバランスする状態にまで断面が変形する。一方、初期の勾配が緩やかであれば、砕波帯内で生じる戻り流れによって輸送された底質が砕波点付近に堆積することや水深の浅い場所と深い場所における砂移動量の差が蓄積されることにより海底が急勾配化する。それによって、波形の非対称性の変化(S_k の減少と A_k の

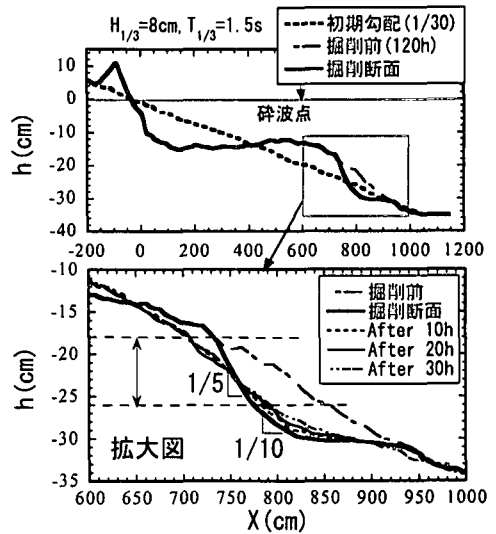


図-3 海浜断面形状と掘削地形の拡大図

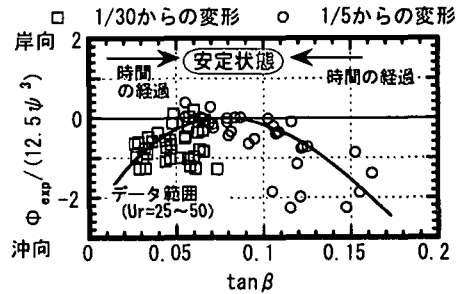


図-4 海底勾配による漂砂量の変化

増加)が生じ、重力の効果とバランスするように働く。

3. V_b を用いた漂砂量の算定法に関する検討

一様勾配の移動床模型海浜に波を長時間作用させた場合の海浜断面の変形過程では、時々刻々海底勾配が変化して波形の非対称性を変化させ、またそれが岸沖漂砂の特性に影響すると考えられる。

前章では、固定床砂れん上の底質移動速度 V_b の実験式を提案した。ここでは、海底勾配の影響を波形の非対称性を通して取り入れた形となっている V_b を利用した漂砂量の算定法について検討した。

(1) 波形非対称性の予測精度

V_b を算定するためには、波形の非対称性を精度良く算定する必要がある。そこで、波形の非対称性に関する実験式(3)(4)の精度を検討を行った。図-5は、表-1のB-2の波について、海底勾配が1/20, 1/10及び1/5の斜面上の波形の非対称性の変化を計算し、実験値と比較したものである。計算では、砕波点までの波高の算定は首藤(1974)の浅水変形理論により求め、砕波の判定は、

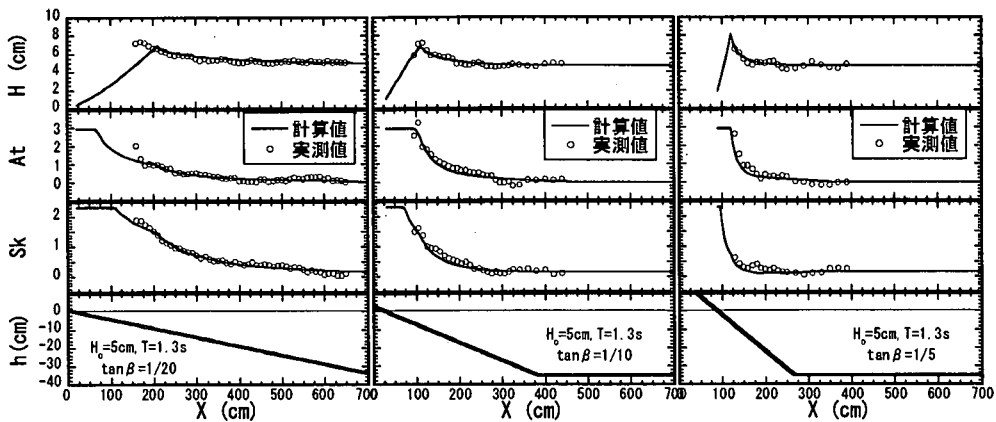


図-5 波形の非対称性の実験値と推定値の比較

渡辺ら (1983) の流速波速比を用いた判定法により行った。砕波後の波高は、波エネルギー E の減衰を $dE/dx = -D$ ($D = \rho g h H^3 / T(4H^2 - H^2)$) で簡便に評価した。ここで ρ は水の密度、 g は重力加速度である。このようにして求めた波高からアーセル数を算定し (3), (4) 式より A_t と S_k を算定した。図より、式 (3), (4) が砕波に至るまでの波形の非対称性の変化傾向をよく表しているといえる。同様の計算を表-1 の全ケースについて行ったところ、 ξ_0 の小さいケースについての一致度は良好であったが、 ξ_0 が大きいケースについては若干一致度が悪くなる傾向が見られた。

(2) V_g を用いた漂砂量の算定

a) 浮遊砂輸送速度 V_{sg} の導入

まず、固定床砂れん上に置かれた砂の移動速度である V_g について考える。砂の全投入量を M 、砂れん一波長 (λ) 当たりで沈殿している砂の量を m とすると、漂砂の連続式より、

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -B\lambda \frac{\partial q_f}{\partial x} \quad (7)$$

が成り立つ。ここで q_f は固定床砂れん上で生じる漂砂量 flux、 B は水路幅である。分布の重心位置 X_g は

$$X_g = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} m \cdot x dx}{\int_{-\infty}^{\infty} m dx} \quad (8)$$

であり、(7), (8) 式を用いて V_g は以下のように表される。

$$V_g = \frac{dX_g}{dt} = \frac{1}{M} \int_{-\infty}^{\infty} q_f dx \quad (9)$$

図-6 は、固定床砂れん上に置かれた砂が波により移動する場合の濃度分布を模式的に示したものである。固定床砂れん上の濃度を c_f とすると、 c_f は分散して底面に存在する砂の量が多いほど c_f も大きくなると考えられる。今、砂れん上に浮いている砂の輸送速度として V_{sg} を考えると、 q_f は近似的に以下のように表される。

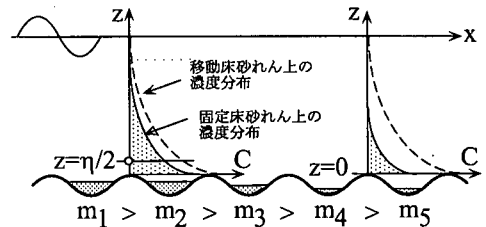


図-6 固定床砂れん上の濃度分布模式図

$$q_f = \int_0^h c_f V_{sg} dz \approx \left[\int_0^h c_f dz \right] V_{sg} \quad (10)$$

(10) を (9) に代入し、 V_{sg} について整理すると、

$$V_{sg} = \left[M / \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^h c_f dz dx \right] V_g = A_v V_g \quad (11)$$

が得られる。これは砂れん上で浮遊移動する砂の輸送速度を V_g より算定できることを示している。

b) 換算係数 A_v についての検討

図-7 は、(11) 式右辺の V_g にかかる係数 (以後 A_v と呼ぶ) を見積もるため、固定床砂れん上の浮遊砂濃度の測定を行った結果である。実験は水路中央に岸沖方向 6 m の範囲にわたり固定床砂れんを水平に設置し (水深 29 cm)、その全ての砂れんの谷部に一様に 2. と同じ砂を投入した。砂れん一波長当たりの投入量 m は 5~20 g の範囲で変化させ、砂れんの設置区間の中央に位置する砂れん頂部上 $\eta/2$ のサイフォンを用いた採水により濃度を測定した。図-7 の縦軸はこれと Shibayama ら (1993) の浮遊砂濃度算定式における基準点濃度 C_a (砂れん頂部上 $\eta/2$ で定義されている) との比較を行ったものである。Shibayama らの基準点濃度 C_a は砂れんがあるところでは

$$C_a = \frac{10}{3} \frac{(\psi - \psi_c) \nu}{\sqrt{(s-1)gd_{50}(\eta/2)}} \quad (12)$$

で表される。ここで ψ_c は移動限界シールズ数 (=0.05)、

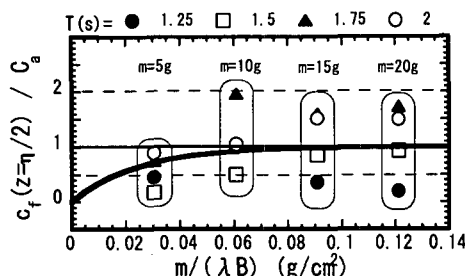
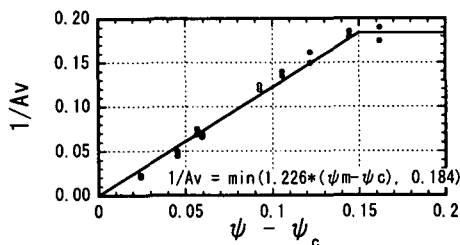
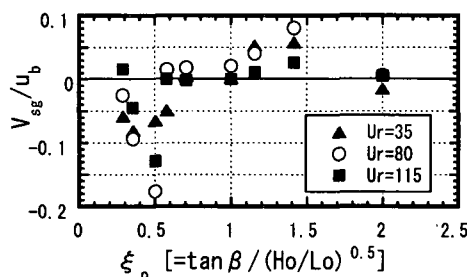


図-7 砂投入量の違いによる基準点濃度

図-8 A_v の算定結果図-9 浮遊砂輸送速度 V_{sg}

ν は動粘性係数である。波は $H=8$ cm で周期 T を図中に示す 4 種類を作用させた。Shibayama らの浮遊砂濃度は、図中破線で示す程度のばらつきをもつ移動床のデータから得られた回帰式である。図より、 m が 10 g 以上では固定床上のデータも破線の範囲に入っており、移動床における浮遊砂とほぼ同等の濃度が生じていることがわかる。図中の曲線は、 $z=\eta/2$ での固定床上と移動床上の浮遊砂濃度比 $c_f(z=\eta/2)/C_a$ を求めたもの、 $c_f(z=\eta/2)/C_a = 1 - \exp\{-41.9m/(\lambda B)\}$ であり、これを用いて (11) 式の A_v の算定を行った結果が図-8 である。 A_v の算定は V_g の算定に使用した底質分布のデータを用いて $c_f(z=\eta/2)/C_a$ を算定し、それを Shibayama らの濃度分布に乗じたものを c_f の鉛直濃度分布として算出した。図の縦軸

($1/A_v$) は砂の全投入量に対する総浮遊量の割合を意味する。

図より、今回 V_g を測定した実験では全投入量の 5~20% の砂が波により巻き上げられていたことがわかる。図-9 は、図-2(c) の V_g について図-8 で求めた A_v を乗じて V_{sg} を算定した結果である。図より、 V_{sg} は V_g の約 10 倍であり、 ξ_0 に対する変化傾向は図-2(c) と同様である。 V_{sg} に浮遊砂濃度の鉛直積分値を掛け合わせることで移動床における砂れん上の浮遊漂砂量フラックスも算定可能であり、海底勾配の変化に伴う漂砂特性を表現できるものと思われる。

4. おわりに

沖浜帯で形成される砂れん上の底質移動と海底勾配の関係を調べる実験を通し、以下のことがわかった。(1) 浅海域で生じる波形の前後・上下の非対称性について再整理して U_r , H_0/L_0 , $\tan \beta$ の 3 つの要素により表した。(2) 波形の非対称性と砂れん上の底質移動との関連を明らかにし、沖浜帯の海浜地形がある勾配のもとで平衡断面に近づくというメカニズムの一部を明らかにした。(3) 固定床砂れん上に置かれた砂の重心移動速度 V_g から浮遊砂の輸送速度 V_{sg} を導き、岸沖漂砂量を砂れんの存在と海底勾配の効果を取り入れて算定する可能性を示した。

謝辞：本研究の遂行において、文部省科学研究費（平成 11 年度奨励研究 A）の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 首藤伸夫 (1974): 非線形長波の変形, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 57-63.
- 砂村継夫・阪東浩造・堀川清司 (1978): 非対称砂れん上での砂移動機構と漂砂量に関する研究, 第 25 回海岸工学講演会論文集, pp. 250-254.
- 武若 聡・入江 功・深川孝之 (1996): 浅海域の水面波形と底面流速波形の非対称特性, 海岸工学論文集, 第 43 巻, pp. 146-150.
- 渡辺 晃・原 哲・堀川清司 (1983): 重畳した波浪場における碎波について, 第 30 回海岸工学講演会論文集, 第 36 巻, pp. 5-9.
- 渡辺 晃・先灘正成・磯部雅彦 (1989): 波・流れ共存場における砂礫形状と漂砂量, 海岸工学論文集, 第 36 巻, pp. 299-303.
- Madsen, O. S. and W. D. Grant (1976): Quantitative description of sediment transport by wave, Proc. 15th Coastal Eng. Conf., ASCE, pp. 1093-1112.
- Shibayama, T. and R. Winyu (1993): Vertical distribution of suspended sediment concentration in and outside surf zone, Coastal Eng. Japan, Vol. 36, No. 1, pp. 49-65.